

## Список литературы:

1. Бородин С.А. Исследование процесса растекания капли жидкости, наносимой на поверхность подложки // Компьютерная оптика. - 2005. - №28-С.66-68.
2. Авакимян Н.Н., Васильев Н.И., Гугучкин В.В., Трофимов А.С., Хаустов С.А. Экспериментальное исследование теплового взаимодействия осаждающихся капель с нагретой поверхностью// IV Minsk International Forum on Heat and Mass Transfer.- 2000.- Т0М 10.-С.315-317.
3. Урюков Б.А., Белик В.Д., Ткаченко Г. В. Приближенные модели динамики и теплообмена импактной цилиндрической струи идеальной жидкости// Инженерно-физический журнал.- 2012. -№2-С.299-304.
4. Bartolo D., Josserand C., Bonn D. Singular Jets and Bubbles in Drop Impact// Phys. Rev. E. -2006. – Vol. 62. – P. 756-765.
5. Губарев В.Я., Арзамасцев А.Г., Испарение капли на высокотемпературной поверхности// Тепловые процессы в технике.- 2010.- №2-С. 63- 66.
6. Испарение капель водного раствора NaCl на твердой подложке/ Е.Г. Орлова, Д. В. Феоктистов // современные техника и технологии: сборник докладов XX Международной юбилейной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 3 т. Т. 3. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 365 с.
7. Gatapova E.Ya., Semenov A.A., Zaitsev D.V., Kabov O.A. Colloids and Surfaces A : Physicochem. Eng. Aspects .- 2014.-V. 441. – С. 776- 785.

УДК 519.95: 629.7

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОПРОВОДЯЩИХ  
ЭЛЕМЕНТОВ НА ГОРЕНИЕ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ**Борисов<sup>1</sup> Б.В. , д.ф.-м.н., Бондарчук<sup>2</sup> С.С. , д.ф.-м.н., Тукаев<sup>3</sup> А.М<sup>1</sup>ТПУ, г. Томск, <sup>2</sup>ТГПУ, г. Томск, <sup>3</sup>НПК «КБМ», г. КоломнаE-mail: [bvborisov@tpu.ru](mailto:bvborisov@tpu.ru)

В процессе проектирования различных энергетических установок, использующих в качестве топлива конденсированные системы (КС), для достижения необходимых характеристик часто приходится решать задачу о максимально возможном увеличении скорости его горения. Одним из распространенных путей решения этой проблемы является размещение в заряде металлических проволочек большой длины, ориентированных по направлению перемещения поверхности КС в процессе горения. Металл проволоки обладает коэффициентом теплопроводности на два порядка больше, чем окружающая ее среда. Это приводит к тому, что теплота из зоны горения вблизи поверхности КС распространяется по проволоке вглубь с большей скоростью, чем скорость горения без проволоки. Эта теплота в свою очередь нагревает прилегающие к проволоке слои КС вплоть до условий воспламенения. Тем самым позволяя увеличить скорость перемещения фронта пламени вдоль проволоки и содействуя эволюции поверхности горения из плоской в коническую.

Данное представление о механизме горения КС с теплопроводящими элементами (ТПЭ) используется всеми исследователями при создании моделей горения, позволяющих определять массовую скорость прихода продуктов сгорания в полость энергетической установки. Зачастую эти модели ориентированы на получение конечных соотношений для стационарной скорости перемещения конической поверхности горения [1-5]. Полученные зависимости не слишком удобны для использования в программах расчета изменения геометрии заряда в процессе горения, для которых необходимо определение скорости перемещения выбранной точки, а не конической поверхности. Расчет же нестационарного процесса образования конической или иной формы поверхности горения в таких программах проводится автоматически по единому сквозному алгоритму.

В данной статье представлена математическая модель, позволяющая построить эффективный алгоритм моделирования нестационарного процесса эволюции поверхности горения КС с достаточной точностью, учитывающий влияние особенности продвижения поверхности горения вдоль ТПЭ.

В процессе формулирования математической модели горения в описанных выше условиях учитывались следующие особенности прогрева топлива в области размещения теплопроводящего элемента.

Число Био для оголенной части проволоки, построенное по диаметру  $D_M = 2 \cdot r_M$  для коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  имеет малое значение:

$$Bi = \frac{\alpha D_M}{\lambda_M} \ll 0.1.$$

Соотношение между коэффициентами теплопроводности топлива  $\lambda_T$  и металла  $\lambda_M$ , как было отмечено выше, имеет примерно тот же порядок малости, что и число Био:

$$\frac{\lambda_T}{\lambda_M} \ll 0.1.$$

Для данных соотношений проволока в поперечном направлении может рассматриваться как термически тонкое тело, и в этой связи прогрев проволоки по ее длине  $x$  моделируется одномерным уравнением теплопроводности, записанным для произвольного элементарного объема:

$$V \frac{\partial T}{\partial t} = aS \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{F}{c_p} q.$$

В данном уравнении  $V, S, F$  – объем, площадь поперечного сечения и площадь боковой поверхности цилиндрической проволоки;  $a$  – коэффициент температуропроводности проволоки;  $q$  – плотность теплового потока через боковую поверхность, которая определяется для оголенной части проволоки в соответствии с законом Ньютона – Рихмана:

$$q = \alpha(T - T_{\text{горения}}),$$

а для проволоки внутри топлива – законом теплопроводности Фурье, в соответствии с градиентом температуры топлива на боковой поверхности проволоки:

$$q = -\lambda_T \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_M}.$$

Приведенный выше анализ, подтвержденный двухмерными расчетами, показывает, что глубина прогрева топлива на несколько порядков (от 2 до 4) меньше глубины прогрева проволоки. Это дает возможность моделировать прогрев топлива и определять тепловой поток на боковой поверхности проволоки в рамках интегрального подхода.

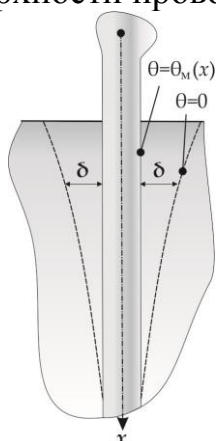


Рис. 1.- Схема области решения

Данный подход основывается на задании температурного профиля в виде известной функции и помогает свести дифференциальное уравнение в частных производных к обыкновенному дифференциальному уравнению.

После анализа результатов двухмерного численного моделирования в качестве функции, определяющей профиль температур в топливо  $T_T$  для выбранной области решения (рис. 1), была выбрана кубическая парабола:

$$\theta = \theta_M \left[ 1 - \frac{\xi}{\delta} \right]^3,$$

где  $\xi = r - r_M$ ;  $T_0$  – начальная температура топлива;  $r$  – радиус, индекс «М» относится к поверхности проволоки.

Данный профиль температуры КС отвечает условиям равенства температуры металла на поверхности проволоки и плавному достижению значения начальной температуры  $T_0$  на глубине прогрева  $\xi = \delta$ :

$$\theta|_{r=r_M} = \theta_M = T - T_0,$$

$$\theta|_{\xi=\delta} = 0; \quad \left. \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \right|_{\xi=\delta} = 0; \quad \left. \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} \right|_{\xi=\delta} = 0.$$

В соответствии с выбранным профилем на границе с проволокой градиент температур определяется по соотношению:

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \right|_{\xi=0} = -\frac{3\theta_M}{\delta}. \quad (1)$$

Глубина прогрева  $\delta$  за время  $t$  соответствует запасенной в КС теплоте:

$$Q = \int_0^t -\lambda_T \left. \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \right|_{\xi=0} dt = \int_0^t \lambda_T \frac{3\theta_M}{\delta} dt. \quad (2)$$

С другой стороны эта теплота определяется интегралом с использованием полученного профиля температур по глубине прогретого слоя, полагая постоянными значения теплоемкости ( $c_T$ ) и плотности топлива ( $\rho_T$ ):

$$Q = c_T \rho_T \int_0^\delta 2\pi(\xi + r_M) \theta_M \left[ 1 - \frac{\xi}{\delta} \right]^3 d\xi.$$

После преобразований данный интеграл записывается следующим образом:

$$Q = 2\pi c_T \rho_T \theta_M \left[ \frac{r_M \delta}{4} + \frac{\delta^2}{20} \right].$$

Полученное квадратное уравнение разрешается относительно глубины прогрева и после анализа корней величина  $\delta$  определяется согласно следующему соотношению:

$$\delta = 2.5r_M \left[ \sqrt{1 + \frac{Q}{12.5\pi c_T \rho_T \theta_M r_M^2}} - 1 \right]. \quad (3)$$

В процессе расчета на каждом временном шаге по текущему значению градиента температур на границе проволока-КС (1) численным интегрированием (2) определяется текущее значение запасенной в слое  $\delta$  теплоты, а по ней вычисляется измененное значение глубины прогрева в соответствии с (3).

С помощью данного подхода были проведены расчеты нескольких модельных вариантов, соответствующих расчетам, результаты которых приведены в [1-5]. Достигнуто удовлетворительное согласие в значениях стационарной скорости перемещения поверхности горения вдоль

проволоки. Необходимо отметить, что в качестве критерия времени зажигания принимался момент достижения температуры на границе проволоки с прогретым слоем критического значения, которое выбиралось из диапазона от 500°C до 600°C. Величина оголенного участка проволоки определяется процессами продвижения поверхности горения КС и плавления металла с последующим уносом его потоком продуктов сгорания. В работах [1-5] рекомендуется коэффициент теплоотдачи из зоны горения в ТПЭ определять из рассмотрения течения продуктов сгорания КС в области конической поверхности заряда вокруг оголенного участка проволоки. Данный подход не в полной мере соответствует горению металлизированного состава, при котором в области малых скоростей течения продуктов сгорания у поверхности КС главным механизмом теплопередачи становится лучистый теплообмен. Предлагается использовать коэффициент теплоотдачи как внешний параметр, определяемый в процессе нахождения основных параметров в камере сгорания. Варьирование коэффициента теплоотдачи в пределах от 10 Вт/(м<sup>2</sup>К) до 500 Вт/(м<sup>2</sup>К) приводит в случае стальной проволоки с  $D_M = 2$  мм к изменению максимального значения толщины  $\delta$  от 50 мкм до 10 мкм, при этом стационарная скорость продвижения поверхности КС вдоль проволоки превышает скорость ее горения, соответственно, от 2 до 7 раз. Что находится в удовлетворительном согласии с данными натурных экспериментов.

#### Список литературы:

1. Golub G. Need for a Variable Burning Rate Solid-Propellant. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1965, Vol. 2, № 4, 593-594.
2. Caveny L.H., Glick R.L. Influence of Embedded Metal Fibers on Solid-Propellant Burning Rate. *Journal of Spacecraft and Rockets*. Vol. 4, Jan. 1967. Pp. 79-85.
3. Бахман Н.Н., Лобанов И.Н. Влияние теплопроводящих элементов на скорость горения. *ФГВ*, 1975, 11, 3, с. 501-506.
4. Cubota N., Ichida M., Fujisawa T. Combustion Processes of Propellants with Embedded Metal Wires. *AIAA Journal* 20.1 (1981): 116-122. Print.
5. Бахман Н.Н., Лобанов И.Н. Влияние диаметра теплопроводящих элементов на их эффективность при горении конденсированных систем. *ФГВ*, 1983, 19, 1, с. 46-50.